



Rôle des fluides dans le comportement hydromécanique des roches fracturées hétérogènes : Caractérisation in situ et modélisation numérique

Frédéric Cappa

► To cite this version:

Frédéric Cappa. Rôle des fluides dans le comportement hydromécanique des roches fracturées hétérogènes : Caractérisation in situ et modélisation numérique. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65, pp.321-337. ineris-00175376

HAL Id: ineris-00175376

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00175376>

Submitted on 2 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Role of fluids in the hydromechanical behavior of heterogeneous fractured rocks: in situ characterization and numerical modelling

Frédéric Cappa ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Géosciences Azur, CNRS-UNSA-IRD-UPMC, 06560 Sophia-Antipolis, France

Abstract

Hydromechanical coupled processes in a shallow fractured rock mass were investigated in situ through field experiments and numerical simulations. The experimental approach consists of performing simultaneous and multi-frequency measurements of fluid pressures and displacements at different points and on different fracture types within a carbonate reservoir. Two kinds of experiments were conducted at the Coaraze Laboratory Site (France):

1. At the fracture network scale, a global hydraulic loading by groundwater level change shows that the coupling between fluid flow and deformation is simultaneously governed by a dual-permeability hydraulic behaviour and a dual-stiffness mechanical behaviour. The following fluid flow and hydromechanical conceptual scheme was established: first, a transient flow only occurs in faults with high permeability; second, when a steady-state flow is reached in faults, water flows from faults into lower permeability bedding planes. The intact rock matrix is practically impervious but the connectivity between the discontinuities is high. When fluid pressure changes occur within the fracture network, the hydromechanical coupling is direct in the highly permeable faults where a pressure change induces a deformation change. No direct hydromechanical coupling occurs within the lower permeability zones where deformation is not directly correlated with pressure changes. This means that the mechanical deformation of the bedding planes and rock matrix is induced by the fault deformation.
2. At the single fracture scale, the hydromechanical behaviour was evaluated by performing hydraulic pulse injection testing. This test was monitored using high-frequency ($f = 120$ Hz) hydromechanical measurements conducted with innovative fiber-optic borehole equipment. The hydromechanical response is simultaneously monitored at two measuring points spaced about 1 m apart within the plane of the sub-vertical fracture. Observed fluid pressure versus normal displacement curves shows a characteristic loop-shaped evolution in which the paths for loading (pressure increase) and unloading (pressure decrease) are different. The test was evaluated by coupled hydromechanical modelling using a distinct element technique. By matching the loop behaviour, modelling indicates that the pulse pressure increase portion allows the fracture hydromechanical properties to be determined while the pulse pressure decrease portion is strongly influenced by the hydromechanical effects within the surrounding fractured rock mass. A sensitivity study shows that the key parameters to coupled hydromechanical processes in such fracture systems are the initial hydraulic aperture and normal stiffness of the fracture, the stiffness of the rock matrix and the geometry of the surrounding fracture network.

Keywords: Hydromechanical couplings - Fractures - In situ measurements - Numerical modelling - Flow - Deformation

Rôle des fluides dans le comportement hydromécanique des roches fracturées hétérogènes: Caractérisation in situ et modélisation numérique

Résumé

Les processus de couplages hydromécaniques dans un massif rocheux fracturé sont étudiés à travers des expérimentations in situ et des simulations numériques. L'approche expérimentale consiste à mesurer simultanément la pression de fluide et le déplacement mécanique en différents points d'un réservoir carbonaté tout en contrôlant les conditions aux limites hydrauliques. Ces mesures sont analysées par modélisation couplée hydromécanique. A l'échelle du massif, mesures et modèles montrent que le couplage hydromécanique est contrôlé par un comportement hydraulique de double perméabilité de fractures associé à un comportement mécanique de double rigidité de fractures. A l'échelle de la fracture unique, des mesures dynamiques par capteurs à fibre optique réalisées lors d'un pulse de pression montrent une réponse pression/déplacement présentant une boucle caractéristique dont l'évolution est différente entre les phases d'augmentation et de chute de pression. A partir de ces données in situ, les paramètres hydromécaniques des fractures et de la matrice rocheuse sont rétro-analysés par les modèles numériques. Ces modélisations montrent que la sensibilité de la réponse hydromécanique de la fracture pressurisée est fortement dépendante de la raideur normale et de l'ouverture hydraulique de la fracture, de la raideur de la matrice rocheuse et de la géométrie du réseau de fractures.

Mots clés : Couplages hydromécaniques - Fractures - Mesures in situ - Modélisations numériques - Ecoulement - Déformation

0. Introduction

La compréhension des effets couplés hydromécaniques dans les massifs rocheux fracturés est devenue une préoccupation scientifique majeure en mécanique des roches et en ingénierie depuis le début des années 80 (Tsang 1999). L'impact des variations dynamiques de pression de fluide ou de contrainte sur le comportement des massifs fracturés a une importance particulière pour les problématiques de stockage de déchets nucléaires, d'extraction d'énergie géothermale et d'hydrocarbures, de transport de contaminants, de séquestration de dioxyde de carbone dans les réservoirs profonds, ou encore de risques naturels induits par les séismes et les glissements de terrains.

Les processus mécaniques et hydrauliques interagissent entre eux et se traduisent par des couplages hydromécaniques car les milieux géologiques contiennent des pores et des fractures qui peuvent être saturés en fluide et déformables. Ces couplages sont très complexes puisqu'ils résultent à la fois de relations "directes" entre pression et déformation des interstices de la roche, et, de relations "indirectes" correspondant à des changements des propriétés hydrauliques et mécaniques du milieu (Rutqvist et Stephansson 2003). Une particularité importante des interactions entre déformation mécanique et écoulement de fluide dans les roches fracturées concerne leurs hétérogénéités à la fois à l'échelle de la fracture unique et à l'échelle du réseau de fractures.

Le comportement hydromécanique des roches fracturées a été étudié à travers de nombreux essais en laboratoire (Tsang et Witherspoon 1981, 1983; Raven et Gale 1985; Makurat et al.

1990; Cook 1992; Gentier et al. 2000; Hopkins 2000; Myer 2000; Pyrak-Nolte et Morris 2000), de tests in situ (Jung 1989; Myer 1991; Cornet et Morin 1997; Cornet et al. 2003; Cappa et al. 2005a) et de modélisations numériques (Rutqvist 1995; Rutqvist et Stephansson 1996; Rutqvist et Tsang 2002; Zangerl et al. 2003). A l'échelle du laboratoire, il a été montré que le comportement hydromécanique d'une fracture dépend de la rugosité de ses épontes (Tsang et Witherspoon 1981; Cook 1992; Gentier et al. 2000; Hopkins 2000; Myer 2000; Pyrak-Nolte et Morris 2000). Cette rugosité règle la quantité et la distribution spatiale des aires de contact, ainsi que de la géométrie de l'espace des vides à l'intérieur de la fracture. A l'échelle du massif, les roches fracturées montrent un comportement couplé hydromécanique fortement hétérogène (Myer 1991; Cornet et Morin 1997; Cornet et al. 2003; Cappa et al. 2005a). Par exemple, dans les roches fracturées à faible perméabilité matricielle, le principal mécanisme contrôlant les processus couplés hydromécaniques sont la déformation mécanique et l'écoulement de fluide se produisant dans le réseau de fractures. Dans un réseau de fractures, les effets hydromécaniques à l'intérieur d'une fracture dépendent à la fois de ses propriétés hydrauliques et mécaniques, mais également de sa connectivité avec les autres fractures, de l'orientation et de l'amplitude des contraintes effectives appliquées, ainsi que des caractéristiques topographiques à grande échelle comme le pendage. De plus, les effets d'échelles et les perturbations liés à l'échantillonnage impliquent que les propriétés hydrauliques et mécaniques d'une fracture naturelle déduites d'échantillons en laboratoire peuvent être très différentes de celles définies in situ. En conséquence, il est difficile d'évaluer les propriétés hydromécaniques in situ d'un massif rocheux fracturé à partir de données de laboratoire. Pour mieux caractériser le comportement hydromécanique des roches fracturées, des expérimentations sur site couplées à une analyse numérique des données apparaissent avoir le meilleur potentiel pour caractériser les phénomènes (Rutqvist et Stephansson 2003). Par exemple, Rutqvist et al. (1998) recommandent de combiner des essais hydrauliques avec des mesures de déplacements mécaniques de la fracture testée afin d'estimer avec précision, par modélisation couplée, les propriétés et le comportement hydromécanique dans une roche fracturée. Néanmoins, rares sont les expérimentations in situ associant simultanément des mesures hydrauliques et mécaniques sur des fractures seules ou à l'intérieur d'un réseau de fractures (Myer 1991; Cappa et al. 2005a).

Le comportement hydromécanique couplé des roches fracturées a été étudié en mécanique des roches sur les 30 dernières années, principalement dans le cadre des programmes de recherche associés à la problématique du stockage géologique profond de déchets nucléaires. Ces recherches concernent l'écoulement de fluide dans des fractures soumises à de fortes contraintes effectives, ayant une ouverture hydraulique relativement faible (quelques dizaines de microns au plus) et une forte raideur mécanique (plusieurs centaines de GPa.m^{-1}). Pour de telles conditions, ces études ont été menées à grande profondeur dans plusieurs laboratoires de recherche souterrains. Dans le présent article, les processus de couplages hydromécaniques sont étudiés in situ dans un réservoir carbonaté fracturé superficiel à faible perméabilité matricielle, sur le "Site Laboratoire de Coaraze" situé dans le Sud-Est de la France. Le projet d'expérimentation in situ et de modélisation numérique de Coaraze a pour but de comprendre les processus mécaniques et hydrauliques dans les roches poreuses et fracturées superficielles dans lesquelles les fractures sont fortement perméables et bien connectées entre elles (Cappa et al. 2005a). C'est un site de taille moyenne ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$) où les conditions expérimentales sont relativement bien contrôlées. Les expérimentations menées sur ce site explorent les mécanismes à une échelle intermédiaire entre les échelles du laboratoire et des réservoirs régionaux.

Dans cet article, nous étudions les processus de couplages hydromécaniques en associant des mesures in situ simultanées de pression de fluide et de déplacement mécanique dans les fractures et la matrice rocheuse durant des expérimentations d'injection hydraulique à la fois à l'échelle du réservoir et à l'échelle de la fracture unique. Les réponses hydromécaniques sont suivies en différents points du massif et sur différents types de discontinuités.

L'article présente, tout d'abord, la configuration expérimentale du site et les résultats des mesures hydromécaniques effectuées durant les tests in situ. Ensuite, nous présentons des modélisations hydromécaniques couplées d'une expérimentation d'injection de type "Pulse test" en se basant sur un modèle aux éléments distincts du réseau de fractures. Dans cette analyse numérique, les réponses pression/déplacement normal observées sont calées pour rétro-analyser l'ouverture hydraulique et la raideur normale de la fracture testée. Nous évaluons également dans une étude de sensibilité l'influence de plusieurs paramètres clés, tels que les propriétés mécaniques et hydrauliques des fractures et de la matrice rocheuse, ainsi que la géométrie du réseau de fracture sur la réponse pression/déplacement observée au niveau de la fracture testée.

1. Expérimentation hydromécanique in situ

1.1. Site test

Les expérimentations in situ ont été conduites sur le "Site Laboratoire de Coaraze" en France (Guglielmi 1998; Cappa et al. 2005a). Ce site est un petit réservoir rocheux fracturé (30 m × 30 m) composé d'une série de calcaires fracturés (d'âge Crétacé inférieur) de 15 m d'épaisseur (Fig. 1a). Les limites hydrauliques du réservoir sont bien contraintes avec des niveaux géologiques imperméables à la base et au sommet, une faille imperméable située en aval (vers le sud-ouest du site), et une surface topographique artificiellement imperméabilisée sur une dizaine de mètres de hauteur. En amont (vers le nord-est du site), une faille perméable permet à l'eau de s'écouler continuellement dans le réservoir. La masse rocheuse est naturellement drainée par une source située dans l'angle sud-ouest du site (Fig. 1a). Pour les expérimentations, la source a été artificiellement fermée avec une vanne dans le but de contrôler la pression dans le réservoir (par ouverture et fermeture de la vanne). Ainsi, quand la vanne est fermée, la pression augmente et se stabilise environ 10 m au dessus de la source. Quand la vanne est ouverte, la source s'écoule et draine les eaux du réservoir.

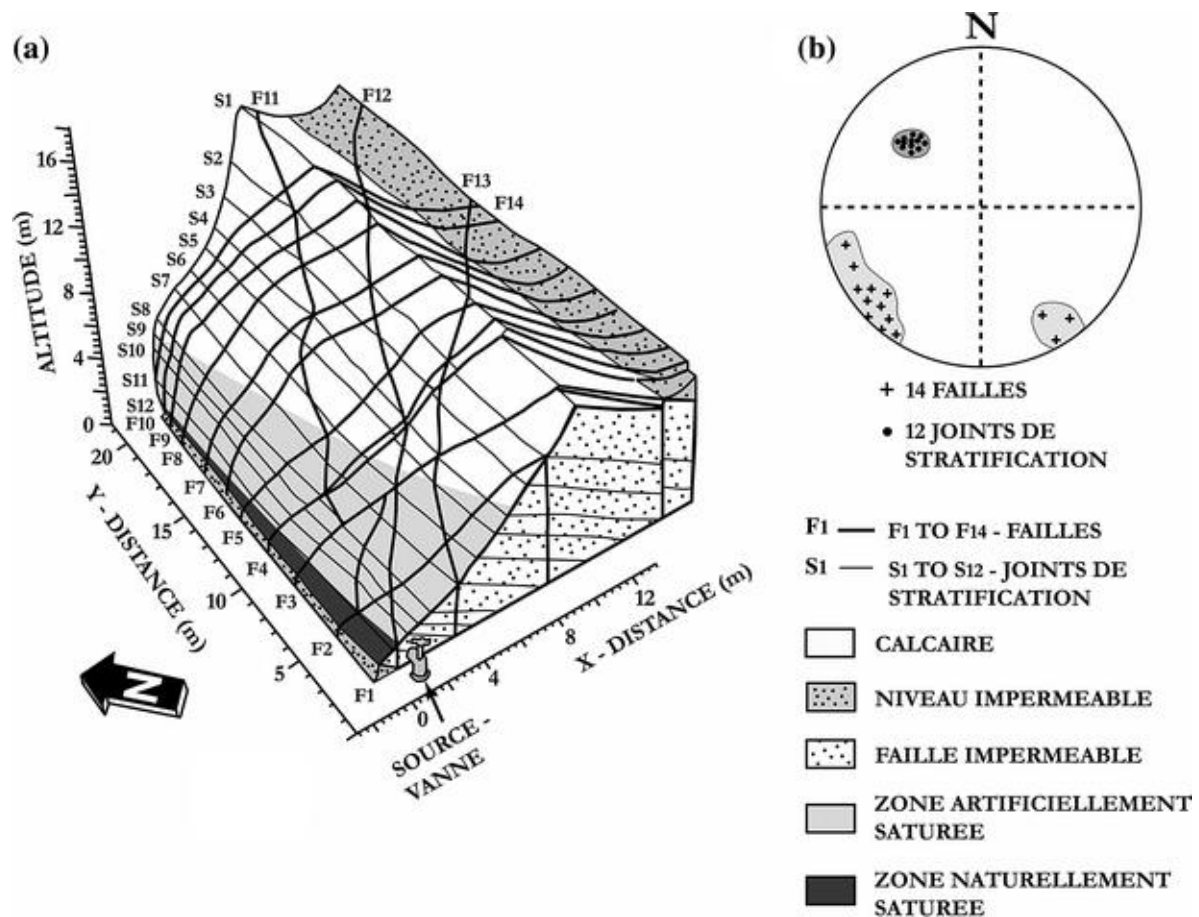


Fig. 1 (a) Vue 3D du Site Laboratoire de Coaraze: contexte hydrogéologique du massif rocheux fracturé; (b) Projection stéréographique des pôles d'orientation des discontinuités

Un modèle tridimensionnel déterministe de la géométrie du réseau de fractures a été obtenu à partir de données structurales et de positionnement géodésique en forage et à l'affleurement. Le réseau est composé de 26 discontinuités persistantes formant trois familles distinctes (Fig. 1a, b):

- 3 failles orientées N50/N70, pendant de 70° à 90° vers le nord-ouest (F₁₁, F₁₂, F₁₃), espacées de 2 à 3 m;
- 11 failles orientées N120/N140, pendant de 75° à 90° vers le nord-est (F₁ à F₁₀ et F₁₄), espacées de 2 m;
- 12 joints de stratification orientés N40 et pendant de 45° vers le sud-est (S₁ à S₁₂), espacées de 0.5 à 1 m.

1.2. Configuration expérimentale

Le dispositif instrumental a été conçu pour mesurer simultanément et dans une large gamme de fréquences les variations de pression, de déplacement normal des fractures et de déplacement dans la matrice rocheuse. Deux dispositifs de mesures ont été mis en place sur le site (Fig. 2a): (1) un dispositif de mesures basses fréquences pour le suivi des réactions hydromécaniques à l'échelle du massif en différents points et sur différents types de discontinuités; et, (2) un dispositif de mesures hautes fréquences avec deux sondes placées sur une faille (F₁₂, Fig. 1a).

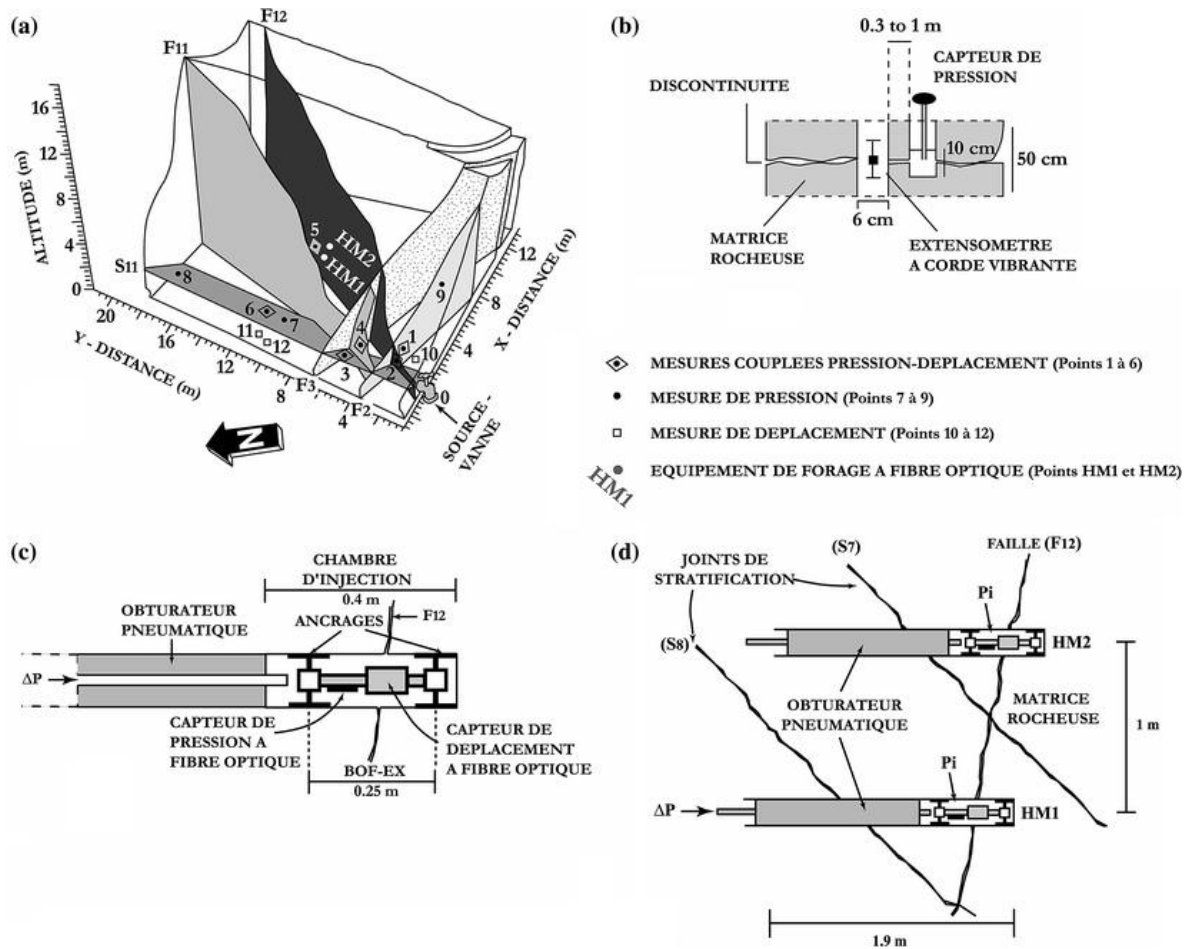


Fig. 2 Instrumentation du Site Laboratoire de Coaraze: (a) position des capteurs en forage; (b) dispositif de mesures couplées pression/déplacement basses fréquences; (c) équipement hydromécanique haute fréquence; (d) dispositif expérimental utilisé pour les essais d'injection "Pulse test"

A l'échelle du massif, le comportement hydromécanique est suivi en 12 points (Fig. 2a):

- 6 mesures couplées de pression et de déplacement normal le long des trois familles de discontinuités: point 1 sur la faille F_2 ; les points 2, 4 et 5 sur les failles F_{11} et F_{12} ; et, les points 3 et 6 sur le joint de stratification S_{11} ;
- Les points 7, 8 et 9 correspondent à des mesures de pressions;
- 3 mesures de déplacement dans la matrice rocheuse. Les points 10 et 11 sont orientés parallèlement aux joints de stratification, tandis que le point 12 est orienté perpendiculairement.

A chaque point de mesures pression/déplacement, deux capteurs à corde vibrante sont installés dans deux forages de petit diamètre ($\varnothing=45$ mm) afin de ne pas perturber l'état de contrainte à l'intérieur du réservoir (Fig. 2b). Tous les points de mesures ont été rigoureusement positionnés à la même altitude.

A l'échelle de la fracture F_{12} , un équipement de forage innovant a été développé pour réaliser des mesures hydromécaniques hautes fréquences durant des essais hydrauliques (Fig. 2c). Ce

dispositif est amovible et basé sur la technologie des capteurs à fibre optique (Cappa et al. 2005b). Il a été spécialement adapté à partir du dispositif BOF-EX développé par RocTest-Telemac®. Il est composé d'un capteur de pression interstitielle à fibre optique et d'un capteur de déplacement normal à fibre optique fixé aux parois du forage par deux ancrages mécaniques localisés de part et d'autre de la fracture testée. Cet équipement est capable de mesurer simultanément, à haute fréquence (120 Hz) et haute précision, la variation de pression ($\pm 1 \text{ kPa}$) et de déplacement normal ($\pm 1 \times 10^{-7} \text{ m}$) de la fracture. Chaque forage s'arrête 10 cm après la faille. Dans chaque forage, la faille a été isolée avec un obturateur pneumatique afin de créer une chambre d'injection de 0.4 m de longueur. Dans chaque chambre, le dispositif de mesures hydromécaniques hautes fréquences a été installé (Fig. 2d).

1.3. Protocoles d'essai

Deux types d'expérimentations hydromécaniques ont été menés dans cette étude:

- Le comportement hydromécanique à l'échelle du réservoir est analysé à travers une expérience de chargement/déchargement hydraulique réalisé par ouverture/fermeture de la vanne placée à l'exutoire du massif. Dans cette expérience, la durée du chargement hydraulique est de 92 min. Le chargement débute quand la vanne est fermée ($t=0 \text{ mn}$, Fig. 3), la pression augmente alors dans le réservoir. Lorsque la vanne est ré-ouverte ($t=92 \text{ mn}$, Fig. 3), le déchargement hydraulique débute et la pression chute.
- A l'échelle de la fracture F_{12} , une série d'injections de courte durée de type "Pulse test" a été réalisée avec le système de mesure à fibre optique installé dans deux forages horizontaux (HM1 et HM2, Fig. 2a, d), espacés de 1 m verticalement, et intersectant perpendiculairement la faille sub-v verticale F_{12} . Avant d'effectuer la série de pulse test, la source est fermée dans le but de saturer le réseau de fractures. Avant chaque pulse test, les valeurs de pression initiale sont de 39 kPa en HM1 et de 27 kPa en HM2. Un pulse test est réalisé par pressurisation de la chambre d'injection. Pour cela, la chambre est connectée à une vanne qui permet une augmentation de pression rapide. Pour chaque pulse, la pression désirée est imposée en amont de la vanne par une pompe volumétrique permettant de générer une augmentation de pression de 10 à 700 kPa. Ensuite, le pulse est initié en une fraction de seconde par ouverture et fermeture instantanées de la vanne afin que l'eau pénètre dans la chambre d'injection. La pression augmente dans la chambre jusqu'à ce que la vanne soit fermée. Après fermeture de la vanne, la pression chute en fonction de l'écoulement dans la faille. Une série de 70 pulse tests de différentes amplitudes ($\Delta P = 9 \text{ à } 86 \text{ kPa}$) et répétés aux moins trois fois a été conduite à la fois en HM1 et en HM2.

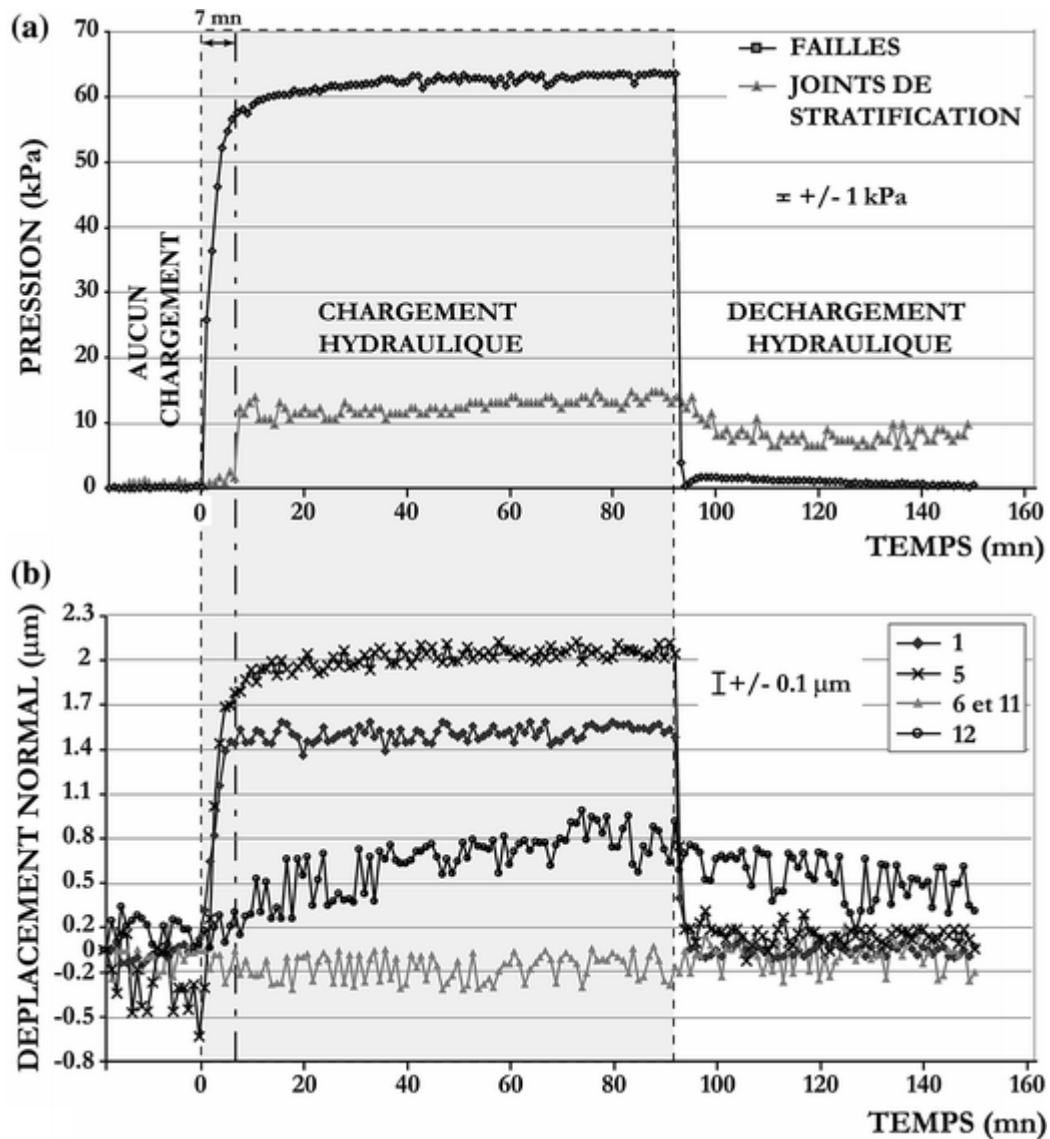


Fig. 3 Variabilité des différents signaux hydromécaniques observés dans une roche fracturée hétérogène

2. Mesures hydromécaniques

2.1. Comportement hydromécanique du réseau de fractures

L'expérience de chargement et de déchargement hydraulique permet d'analyser le comportement hydromécanique global et l'écoulement dans le réservoir. Les mesures aux points 1 (Faille F_2), 5 (Faille F_{12}), 6 (Joint de stratification S_{11}), 11 et 12 (Matrice rocheuse) sont présentées comme exemple type de signaux hydromécaniques, dans la mesure où pour le même type de discontinuités, les autres points de mesures montrent des signaux similaires.

En se basant sur l'évolution des pressions dans le temps, les mesures montrent qu'un comportement de double perméabilité de fractures contrôle les réponses hydrauliques du réservoir (Fig. 3a). L'expérience de chargement hydraulique débute quand la vanne est complètement fermée ($t=0$ min, Fig. 3a). Avant la fermeture de vanne, le massif est sec.

Quand la vanne est fermée, la pression dans les failles atteint 58 kPa en 7 min. Au bout de 7 min, l'écoulement atteint un état quasi-permanent dans les failles, et l'eau s'écoule alors des failles vers les joints de stratification. En fin d'expérience, la pression atteint alors 65 kPa dans les failles et 15 kPa dans les joints de stratification à l'état permanent. La matrice rocheuse carbonatée entre les failles et les joints de stratification est pratiquement imperméable ($k = 9.8 \times 10^{-17} \text{ m}^2$) et peu poreuse ($\phi = 0.02$), tandis que la connectivité entre les discontinuités est forte. Après 92 min de chargement hydraulique (zone grise sur la Fig. 3), la vanne est ré-ouverte. La pression chute en 2 min dans les failles, alors qu'elle diminue lentement dans les joints de stratification (Fig. 3a). A partir de plusieurs expériences de chargement et de déchargement hydraulique, Guglielmi et Mudry (2001) puis Cappa et al. (2005a) montrent que la conductivité hydraulique des failles est élevée (0.57×10^{-4} à $1.9 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$), et que celle des joints de stratification est faible (0.9×10^{-6} à $7.6 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$).

Quand le chargement hydraulique est appliqué, les mesures de déplacement mécanique montrent des signaux non linéaires variables selon les points de mesure et dont les réponses et les amplitudes sont plus ou moins corrélées avec les variations de pression (Fig. 3b). Les mesures indiquent qu'un comportement de double raideur de fractures contrôle les réponses mécaniques du réseau de fractures:

- Les failles s'ouvrent instantanément quand la pression augmente. Les déplacements se stabilisent quand la pression ne varie plus dans les failles. L'amplitude des déplacements normaux atteint alors $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ au point 1, et $2 \times 10^{-6} \text{ m}$ au point 5. Dans ces deux failles, le retour à l'état mécanique initial est atteint après deux minutes de déchargement hydraulique.
- Dans la matrice rocheuse, les déplacements sont hétérogènes. Les déplacements perpendiculaires aux joints de stratification (points 6 et 11) sont faibles ($0.2 \times 10^{-6} \text{ m}$) et ne présentent pas de corrélation directe avec les variations de pression dans les discontinuités. Les déplacements parallèles aux joints de stratification (point 12) augmentent progressivement durant les 92 min de chargement hydraulique. Les valeurs varient de 0 à $0.9 \times 10^{-6} \text{ m}$. L'état mécanique initial n'est pas atteint quand la vanne est ré-ouverte car la durée du chargement hydraulique est trop courte pour atteindre un état mécanique permanent (Cappa et al. 2005a).

2.2. Comportement hydromécanique à l'échelle de la fracture unique

Les mesures hydromécaniques réalisées lors d'un pulse test d'amplitude 86 kPa appliqué en HM1 (Fig. 2a–d) sont présentées comme exemple de résultats. Répétés pour différentes amplitudes de pulse, tous les essais montrent la même forme de signal. Les données ont été échantillonnées à un taux de 120 mesures par seconde et filtrées du bruit instrumental. Les filtres utilisés sont des filtres récurifs passe-haut et passe-bas de Butterworth implémentés en une cascade de filtres avant/arrière de second ordre (Jackson 1995). Comparés aux équipements de forage classiques pour lesquels la fréquence d'échantillonnage du pulse est faible, les capteurs à fibre optique permettent une mesure très précise, avec un taux d'échantillonnage élevé, de toute la variation de pression et de déplacement durant un pulse de courte durée. Ainsi, comparés aux courbes de pulse classiques pour lesquelles seule la chute de pression peut être mesurée avec une résolution suffisante, les capteurs à fibre optique permettent d'interpréter les données à la fois durant les phases d'augmentation et de chute de pression du pulse.

Pour un essai d'une durée de 40 s, l'initiation du pulse ($t=0$ sur la Fig. 4a) commence 15 s après le début du suivi. En HM1, la variation de pression indique un comportement

oscillatoire non linéaire, qui pourrait résulter d'un écoulement rapide lié à la forte perméabilité de la faille F12 comme cela a déjà été décrit dans des cas analogues (McElwee 2002). La pression augmente de 39 kPa à 125 kPa en 3.5 s, puis diminue pour atteindre sa valeur initiale en 8 s. Le déplacement normal suit la variation de pression, bien qu'il soit plus amorti. Au pic de pression, l'amplitude de déplacement en HM1 atteint un maximum de 1.9×10^{-6} m. En HM2, le pic de pression est plus faible que en HM1 ($\Delta P = 22$ kPa au lieu de 86 kPa), et il est atteint 1.5 s plus tard. En HM2, la chute de pression est plus lente que en HM1. La variation de déplacement normal en HM2 suit la variation locale de pression, avec une amplitude de déplacement atteignant un maximum de 0.45×10^{-6} m.

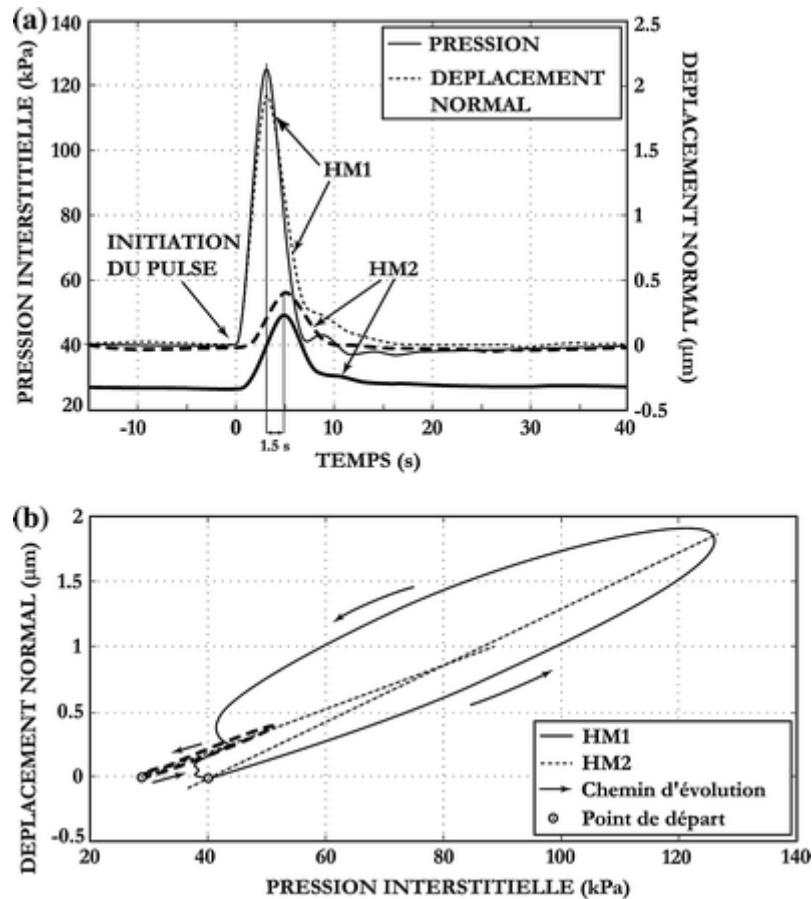


Fig. 4 a, b Résultats d'un pulse test imposé en HM1 avec mesures simultanées de la pression interstitielle et du déplacement normal en HM1 et en HM2

La Fig. 4b présente le même pulse test sous la forme d'un graphe pression/déplacement normal. A la fois en HM1 et en HM2, les courbes suivent une évolution en forme de boucle dont le chemin diffère durant les phases d'augmentation et de diminution de pression. Les courbes sont parfaitement réversibles et répétibles. Durant l'évolution du pulse, la boucle est régulière, excepté lorsqu'on approche le retour à la pression initiale où la forme de la boucle devient oscillatoire. Les mesures montrent que plus l'amplitude du pulse est importante, plus la boucle est épaisse. Les résultats indiquent également une différence de pente dans les boucles observées en HM1 et HM2 (lignes en pointillées sur la Fig. 4b).

Les mesures montrent un décalage temporel entre la pression et le déplacement normal. Le pic de déplacement se produit légèrement après le pic de pression, ce qui explique la forme en

boucle de la courbe pression/déplacement (Fig. 4b). La comparaison entre les boucles en HM1 et en HM2 indique que le décalage temporel est moins important en s'éloignant du point d'injection.

3. Protocole de détermination des propriétés hydrauliques et mécaniques des fractures et de la matrice rocheuse par modélisation hydromécanique couplée d'une injection "Pulse test"

3.1. Méthode d'analyse numérique

L'approche numérique utilisée pour simuler l'injection du pulse de pression permet d'expliquer les interactions hydromécaniques hétérogènes dans un réseau complexe de fractures, ainsi que les interactions hydromécaniques entre les fractures et la matrice rocheuse. Le code de calcul aux éléments distincts 3DEC (Cundall 1988) est utilisé pour simuler la réponse hydromécanique 3D de la fracture testée à l'intérieur du réseau de fractures. Ce code simule les processus couplés de déformation et d'écoulement dans des fractures au sein d'une matrice rocheuse imperméable.

Dans cette analyse numérique, le comportement hydromécanique des discontinuités et de la matrice rocheuse est considéré comme linéaire et élastique. Une forme modifiée de la loi cubique (Witherspoon et al. 1980; Rutqvist et Stephansson 2003) gouverne l'écoulement de fluide dans les fractures. Les déformations et les ouvertures hydrauliques des fractures sont calculées en fonction des contraintes effectives en supposant une raideur normale constante des fractures.

3.2. Géométrie, conditions aux limites et hypothèses de base

La Fig. 5 présente la géométrie et les conditions aux limites du modèle 3DEC. Le modèle correspond à une représentation explicite tridimensionnelle du réseau de fractures autour de la zone d'injection. Ce modèle considère trois failles (F_{11} , F_n , F_{12}) et quatre joints de stratification (S_7 , S_8 , S_9 , S_{10}) (Figs. 1, 5a). Le modèle correspond à un cube de 6 m de côté centré sur HM1. Basées sur des évaluations numériques antérieures (Cappa et al. 2005c), la taille du modèle et les conditions aux limites hydrauliques et mécaniques sont choisies de manière à ce qu'elles n'influencent pas la réponse hydromécanique. Les conditions de pression in situ et aux limites correspondent au gradient de pression hydrostatique naturel dans le réservoir (Fig. 5b). Sur la limite sommitale du modèle, une contrainte verticale correspondant au poids des terrains sus-jacents est appliquée avec des déplacements imposés aux autres limites. La contrainte in situ correspond au poids des terrains avec la profondeur.

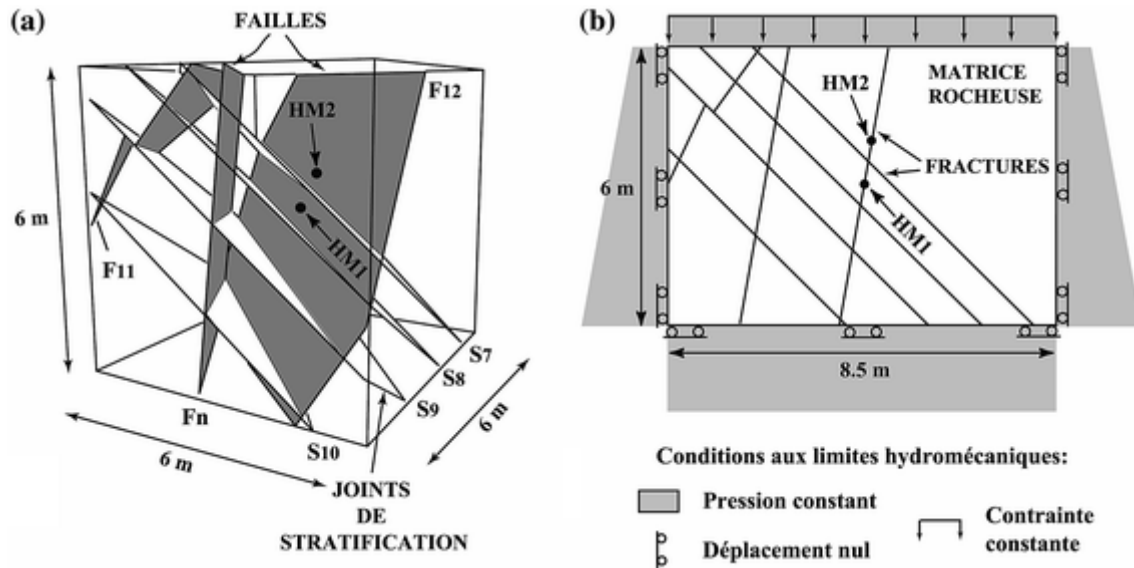


Fig. 5 a Géométrie du modèle 3DEC du réseau de fractures autour du point d'injection HM1. b Conditions aux limites hydrauliques et mécaniques utilisées dans le modèles 3DEC et présentées le long d'une coupe transversale passant par HM1 et HM2

Dans chaque simulation, le pulse test est simulé en imposant la chronique de pression observée dans le temps au point d'injection HM1 (Fig. 4a). Une fonction spéciale pour l'application d'un pulse de pression transitoire en un point source local a été implémentée dans le code en utilisant le langage de programmation "FISH". La fonction est incrémentée dans le temps avec l'analyse hydromécanique. A chaque pas de temps hydraulique, l'équilibre mécanique est atteint avec une actualisation des contraintes effectives qui induisent des variations de déplacements normaux et tangentiels, et, par conséquent, d'ouverture hydraulique des fractures.

Les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse et les propriétés hydromécaniques des joints de stratification (Tableau 1) sont déduites d'expériences in situ et d'essais en laboratoire antérieurs (Cappa et al. 2005a). Basées sur des évaluations antérieures de la perméabilité hydraulique des failles (Guglielmi et Mudry 2001; Cappa et al. 2005a), les ouvertures initiales des failles ont été prises égales à 1×10^{-4} m.

Tableau 1 Propriétés des matériaux utilisés dans l'analyse numérique hydromécanique couplée

| Matériaux | | Paramètres | Valeurs |
|--------------------------|-----|--|--------------------|
| Failles | HM1 | Raideur normale, k_{nF} (GPa.m ⁻¹) | 17 |
| | | Raideur tangentielle, k_{sF} (GPa.m ⁻¹) | 17 |
| | | Ouverture hydraulique, b_{hiF} (m) | 1×10 ⁻⁴ |
| | HM2 | Raideur normale, k_{nF} (GPa.m ⁻¹) | 50 |
| | | Raideur tangentielle, k_{sF} (GPa.m ⁻¹) | 5 |
| | | Ouverture hydraulique, b_{hiF} (m) | 5×10 ⁻⁵ |
| Joints de stratification | | Raideur normale, k_{nJS} (GPa.m ⁻¹) | 100 |
| | | Raideur tangentielle, k_{sJS} (GPa.m ⁻¹) | 10 |
| | | Ouverture hydraulique, b_{hiJS} (m) | 1×10 ⁻⁵ |
| Matrice rocheuse | | Module d'Young, E_R (GPa) | 70 |
| | | Coefficient de Poisson, ν_R (-) | 0.29 |
| | | Densité, ρ_R (kg.m ⁻³) | 2400 |
| | | Perméabilité, k_R (m ⁻²) | 0 |
| Fluide | | Densité, ρ_f (kg.m ⁻³) | 1000 |
| | | Module de compressibilité, K_f (GPa) | 2 |
| | | Viscosité dynamique, μ_f (Pa.s ⁻¹) | 1×10 ⁻³ |

4. Résultats des modélisations hydromécaniques et analyse de sensibilité

4.1. Cas de référence: calage mesures/modèle

Le calage est obtenu pour des valeurs différentes de raideur normale et d'ouverture hydraulique initiale en HM1 et en HM2 à l'intérieur de la faille F_{12} (Tableau 1, Fig. 6a). Dans cette solution de calage, les propriétés de la fracture sont supposées être égales à celles de HM1 dans toute la fracture, excepté dans un rayon de 30 cm autour de HM2 où les propriétés rétro-analysées en HM2 sont considérées. La valeur de la raideur normale initiale en HM2 est d'un facteur 3 plus grande que celle en HM1, et, la valeur d'ouverture hydraulique initiale en HM2 est d'un facteur 2 plus faible que celle en HM1. Ces paramètres de référence ont été vérifiés à la fois en HM1 et en HM2 pour deux autres pulses tests. Un pulse de 9 kPa en HM1 et un pulse de 35 kPa en HM2 ont été simulés. Les deux simulations (Fig. 6b, c) donnent un calage mesures/modèles pour les mêmes paramètres hydromécaniques que précédemment obtenus avec le pulse de 86 kPa (Tableau 1). Cette vérification confirme que les propriétés hydromécaniques varient d'un facteur 2 à 3 pour deux points espacés de 1 mètre le long d'un même plan de fracture.

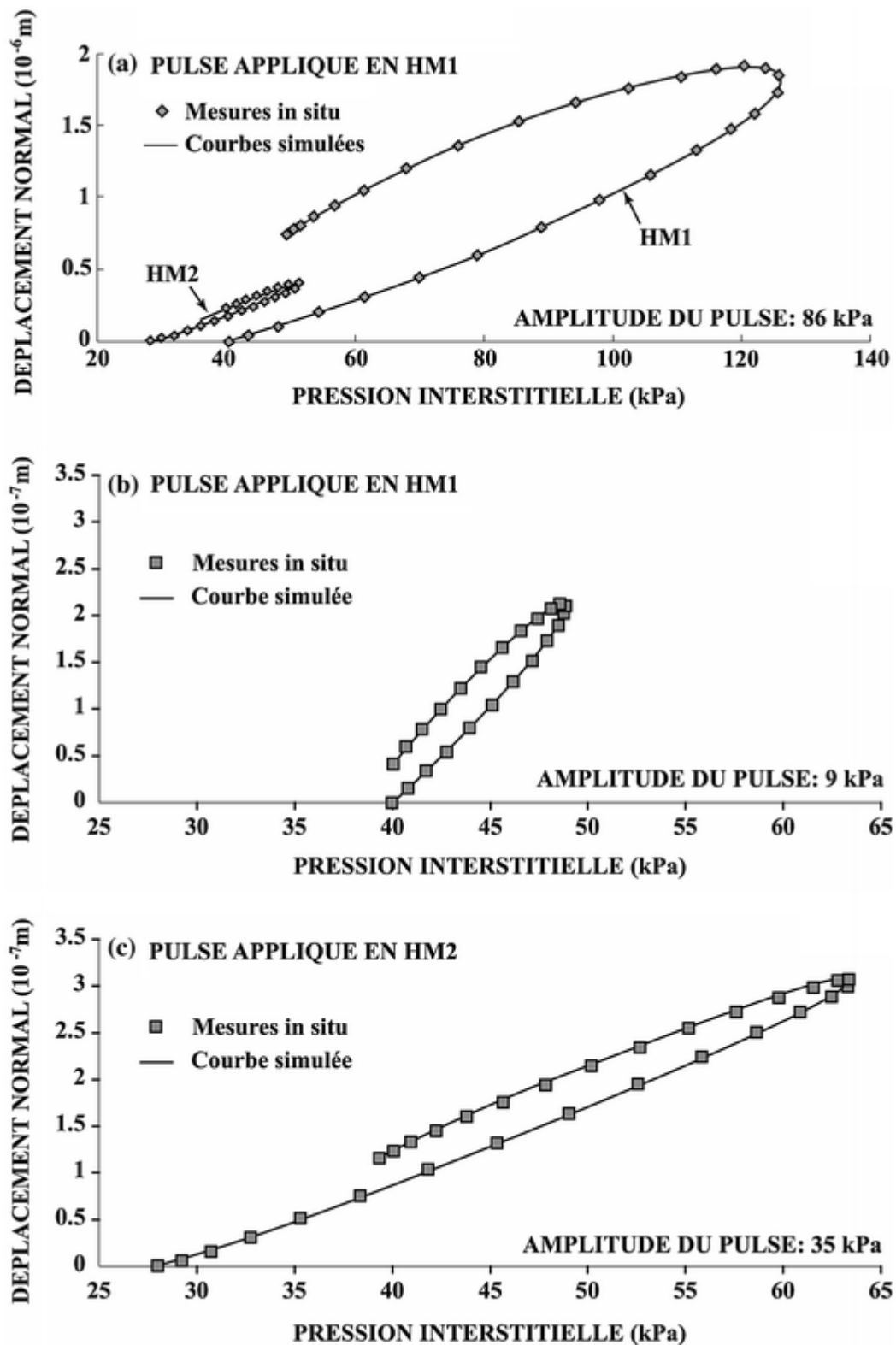


Fig. 6 Solution de calage pour la modélisation hydromécanique couplée comparée aux mesures in situ: (a) Cas de référence; (b) Vérification des paramètres rétro-analysés en HM1 avec le cas de référence par simulation d'un pulse de 9 kPa appliquée en HM1; (c) Vérification des paramètres rétro-analysés en HM2 avec le cas de référence par simulation d'un pulse de 35 kPa appliquée en HM2

Cette solution de calage (Fig. 6a) indique que le gradient de pression induit par l'injection est principalement distribué dans la faille pressurisée. Néanmoins, une partie de l'écoulement se produit à l'intérieur des joints de stratification (S_7 et S_8) proches de HM1 et HM2. Durant l'augmentation de pression, l'écoulement dans les joints de stratification induit une ouverture mécanique progressive le long de ces plans (Fig. 7a–c). Au voisinage immédiat de la faille pressurisée, le déplacement normal des joints de stratification atteint une amplitude ($\delta U_n = 6 \times 10^{-7}$ m) plus importante que celui de la faille en HM2. De plus, l'ouverture de la faille cause du cisaillement le long des joints de stratification, dont l'amplitude ($\delta U_s = 4.25 \times 10^{-7}$ m) est du même ordre de grandeur que le déplacement normal en HM2. Durant la chute de pression, l'ouverture progressive des joints de stratification se poursuit en s'éloignant de la faille pressurisée, alors que près de la faille, les joints de stratification tendent à se fermer (Fig. 7b–d).

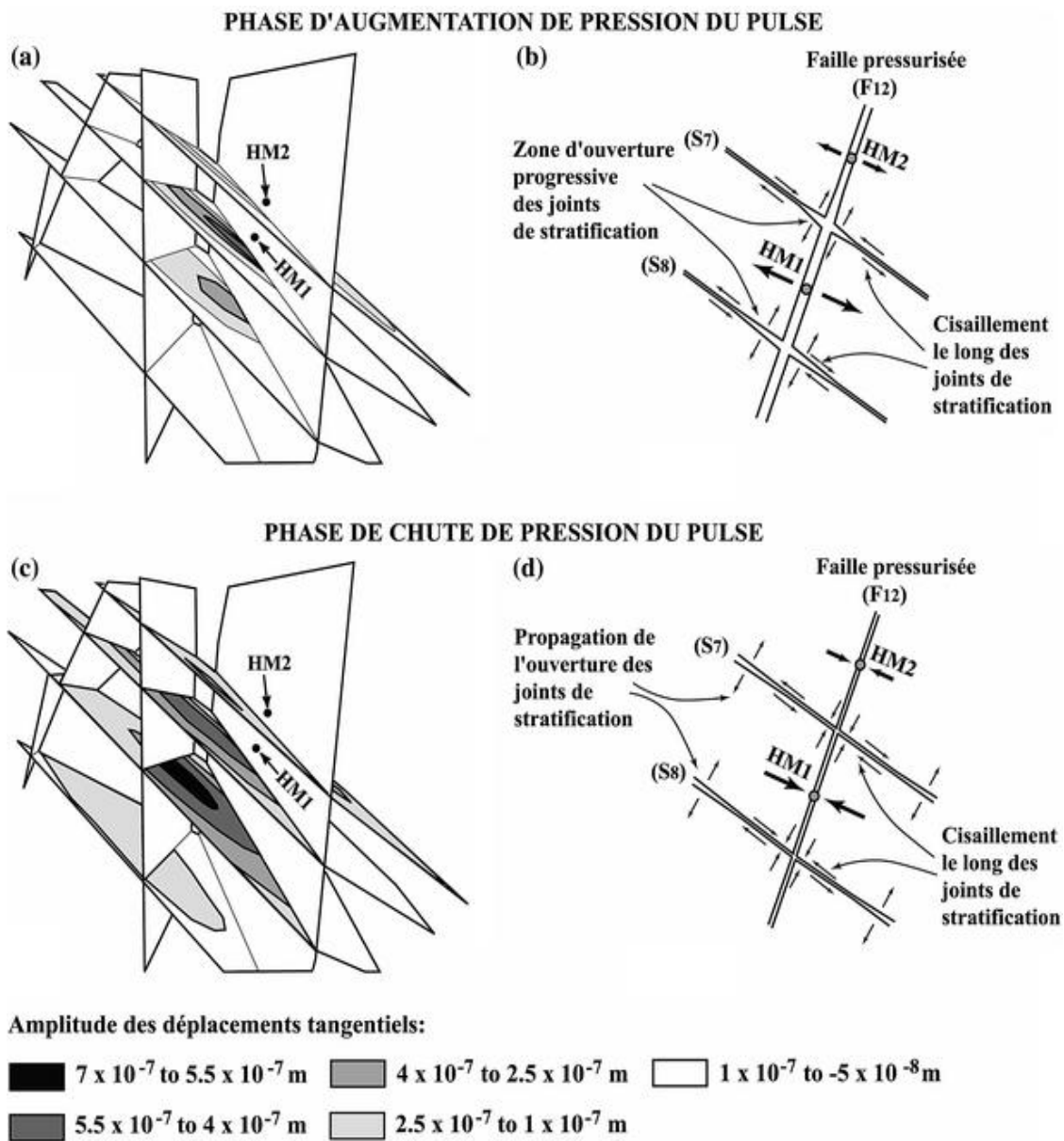


Fig. 7 a–b Déplacements tangentiels simulés le long des joints de stratification durant le pulse de pression; c–d Modèle conceptuel 2D des variations de déformations le long des joints de stratification durant le pulse de pression

En résumé, cette solution de calage montre une légère différence de propriétés hydromécaniques pour deux points très proches à l'intérieur du plan de faille. Durant l'injection du pulse, des déplacements normaux et tangentiels induits mécaniquement ou hydromécaniquement se produisent dans les joints de stratification et les failles à l'intérieur de la masse rocheuse environnant la faille testée. Ces effets adjacents contribuent de manière significative à accommoder les déformations de la faille pressurisée.

Cette solution de calage est utilisée comme cas de référence dans une étude de sensibilité, présentée ci-après, pour évaluer l'importance de chaque paramètre hydromécanique ainsi que l'importance de la géométrie du réseau de fractures sur la réponse hydromécanique de la faille en HM1 et en HM2. Les propriétés des failles F_{11} et F_n (Fig. 5a) sont supposées identiques à celles déduites en HM1.

4.2. Etude de sensibilité

Effets de la raideur normale et de l'ouverture hydraulique de la faille testée

La raideur normale initiale de la faille affecte fortement la réponse pression/déplacement normal en HM1 (Fig. 8a). Si la raideur normale de la faille est plus faible que la valeur de référence ($k_{nF} = 17 \text{ GPa.m}^{-1}$), le déplacement normal et l'épaisseur de la boucle augmentent. Inversement, si la raideur normale est plus forte, le déplacement normal et l'épaisseur de la boucle diminuent. En HM2, la réponse hydromécanique suit la même variation que en HM1, mais l'amplitude de déplacement est plus faible à cause de la différence de raideur normale initiale entre les deux points (Fig. 9a).

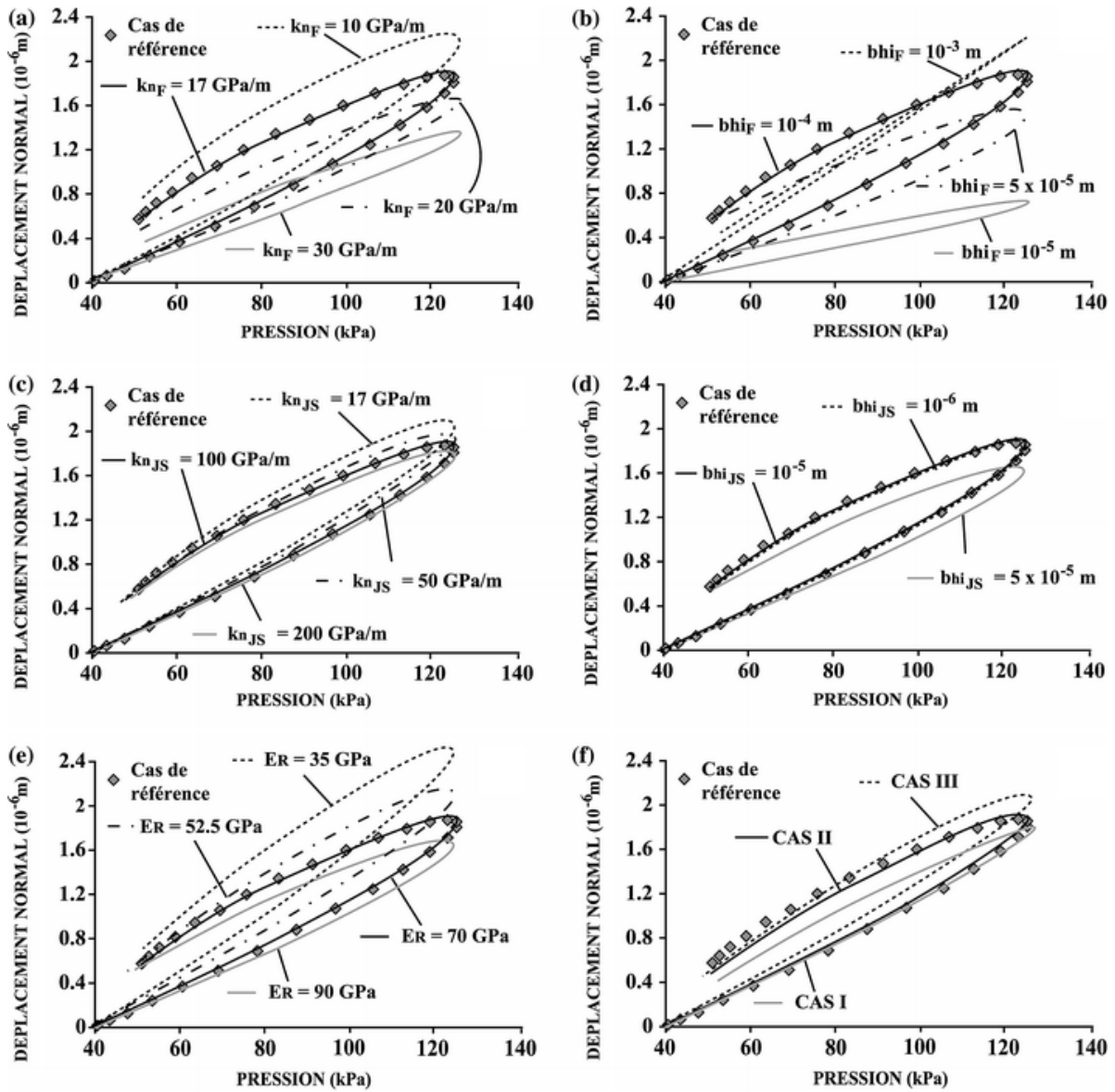


Fig. 8 Analyse de sensibilité d'un pulse de pression imposé en HM1 avec variation: (a) de la raideur normale initiale en HM1 (k_{nF}); (b) de l'ouverture hydraulique initiale en HM1 (b_{hiF}); (c) de la raideur normale initiale des joints de stratification (k_{nJS}); (d) de l'ouverture hydraulique initiale des joints de stratification (b_{hiJS}); (e) du module d'Young de la matrice rocheuse (E_R); (f) de la géométrie du réseau de fractures (CAS I, II, III)

En HM1, une variation de l'ouverture hydraulique initiale de la faille d'un facteur 10 a une influence importante à la fois sur l'amplitude de déplacement normal et sur l'épaisseur de la boucle (Fig. 8b). Plus l'ouverture hydraulique initiale est importante, plus l'amplitude du déplacement normal est grande. Pour une ouverture hydraulique importante, la pression de fluide pénètre plus loin dans la fracture pour une pression au point d'injection et un incrément de temps donné (le fait que la pression de fluide pénètre plus loin pour une plus grande ouverture hydraulique est expliqué par une augmentation de pression en HM2, Fig. 9b). Une augmentation de pression plus étendue (avec un rayon d'influence du pulse plus grand) exerce une force plus importante sur les épontes de la fracture et induit une ouverture plus importante de la fracture. De plus, si l'ouverture hydraulique initiale de la faille pressurisée est très

grande par rapport à celle des joints de stratification, l'écoulement et la relation pression/déplacement sont prédominants à l'intérieur de la faille. Si l'ouverture hydraulique initiale de la faille est très proche de celle des joints de stratification (l'ouverture de tous les joints de stratification est de 1×10^{-5} m pour les résultats de la Fig. 9b), une quantité importante de fluide injecté s'écoule dans les joints de stratification connectés à la faille. Cela signifie que la pression de fluide ne pénétrera pas loin dans la faille, mais s'écoulera plutôt dans les joints de stratification adjacents. Le couplage pression/déplacement se produira alors dans l'ensemble du réseau de discontinuités. Les résultats de modélisation indiquent aussi que le contraste de perméabilité entre la faille pressurisée et les joints de stratification affecte la réponse pression/déplacement en HM2 (Fig. 9b). La figure 9b montre que l'ouverture hydraulique de la faille pressurisée affecte fortement l'amplitude de pression observée en HM2.

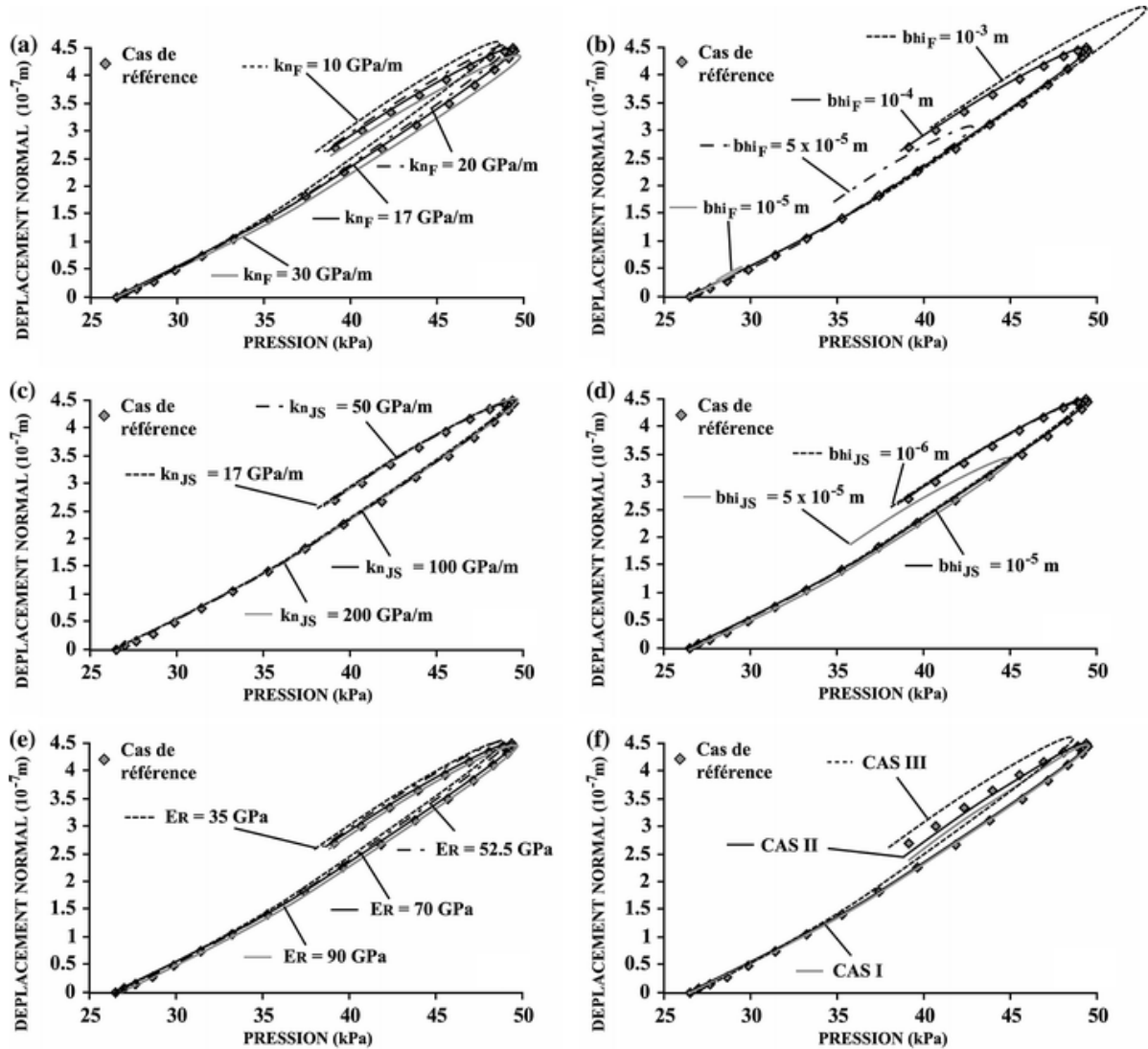


Fig. 9 Analyse de sensibilité en HM2 pour un pulse de pression imposé en HM1 avec variation: (a) de la raideur normale initiale en HM1 (k_{nF}); (b) de l'ouverture hydraulique initiale en HM1 (b_{hiF}); (c) de la raideur normale initiale des joints de stratification (k_{nJS}); (d) de l'ouverture hydraulique initiale des joints de stratification (b_{hiJS}); (e) du module d'Young de la matrice rocheuse (E_R); (f) de la géométrie du réseau de fractures (CAS I, II, III)

Effets de la raideur normale et de l'ouverture hydraulique des joints de stratification

Une variation de la raideur normale des joints de stratification de 50 à 200 GPa.m⁻¹ n'a pas d'effet important sur la réponse hydromécanique de la faille, ni en HM1, ni en HM2 (Figs. 8c et 9c). Une valeur de raideur des joints de stratification égale à celle de la faille a un effet mineur en HM1.

Une diminution de l'ouverture hydraulique initiale des joints de stratification d'un facteur 10 n'a pas d'effet sur la réponse pression/déplacement (Figs. 8d et 9d). Une augmentation de l'ouverture hydraulique d'un facteur 5 induit une légère diminution du déplacement normal en HM1, et une légère diminution de pression et de déplacement normal en HM2. Ceci est aussi dû au fait que l'effet de la pression de fluide sur le déplacement mécanique de la faille dépend du contraste d'ouverture hydraulique entre la faille pressurisée et les joints de stratification connectés. Comme discuté dans la partie « Cas de référence: calage mesures/modèle », si l'ouverture hydraulique des joints de stratification est égale ou proche de l'ouverture hydraulique initiale de la faille pressurisée, une quantité importante de fluide s'écoule dans les joints de stratification. Ainsi, la quantité d'eau circulant dans la faille est plus faible, ce qui tend à diminuer la surface de fracture pressurisée et à induire une diminution de la force totale exercée contre les épontes de la faille.

Effets du module d'Young de la matrice rocheuse

Une diminution du module d'Young d'un facteur 1.5 à 2 augmente de manière significative le déplacement normal en HM1 (Fig. 8e). Une augmentation du module d'Young d'un facteur 1.5 diminue légèrement le déplacement normal en HM1. L'amplitude des variations de pression n'est pas affectée. En HM2, une variation du module d'Young induit une très légère diminution du déplacement normal (Fig. 9e) car la raideur plus forte en HM2 réduit l'effet de la déformation de la matrice rocheuse sur la déformation de la faille.

Effets de la géométrie du réseau de fractures

Les effets de la géométrie du réseau de fractures sur la réponse hydromécanique de la faille pressurisée (F_{12}) sont mis en évidence en comparant les trois modèles numériques suivants:

- La faille F_{12} seule dans la matrice rocheuse intacte (Cas I);
- Les failles F_{11} , F_n , F_{12} et aucun joint de stratification (Cas II);
- Les joints de stratification S_7 , S_8 , S_9 , S_{10} et la faille F_{12} (Cas III).

Les résultats présentés pour les points HM1 (Fig. 8f) et HM2 (Fig. 9f) montrent que le Cas I, avec la faille pressurisée F_{12} seule dans la matrice rocheuse intacte, restitue les mesures seulement pour la phase d'augmentation de pression du pulse. Ainsi, durant l'augmentation de pression, les propriétés intrinsèques de la faille F_{12} près du forage et les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse environnante contrôlent le comportement de la faille. Durant la phase de diminution de pression, le Cas I sous-estime l'ouverture de la faille car le déplacement est limité par la forte raideur de la matrice rocheuse comparée à celle de la faille. Le Cas II qui inclut les failles dans la matrice rocheuse intacte mais néglige les joints de stratification, restitue les mesures durant la phase d'augmentation de pression et la moitié de la phase de chute de pression. Ce résultat confirme que les failles adjacentes (F_{11} et F_n) affectent la réponse hydromécanique de la faille pressurisée durant la phase de chute de pression. Le Cas III qui inclut les quatre joints de stratification et la faille F_{12} mais néglige les failles parallèles

(F_{11} et F_n) ne restitue pas les mesures. Le déplacement normal est surestimé car le cisaillement additionnel qui se produit le long des joints de stratification cause une amplification de l'ouverture mécanique de la faille.

5. Discussion

5.1 Réponses hydromécaniques du réseau de fractures

Les mesures simultanées de pression de fluide et de déplacement mécanique montrent des réponses hydromécaniques variables et interdépendantes. Ces mesures indiquent un couplage hydromécanique direct dans les failles de forte perméabilité dans lesquelles une augmentation de pression est directement accompagnée d'une ouverture de la faille. Aucun couplage hydromécanique ne se produit dans les zones peu perméables où le déplacement n'est pas corrélé avec l'augmentation de pression, ce qui signifie que la déformation mécanique dans les joints de stratification et la matrice rocheuse est induite par l'ouverture des failles adjacentes à forte perméabilité.

5.2. Implications pour la détermination in situ des propriétés hydromécaniques

L'analyse numérique identifie les paramètres clés qui influencent les résultats in situ. Les deux paramètres les plus importants qui déterminent les réponses pression/déplacement sont la raideur normale de la fracture et le module d'Young de la roche intacte. De plus, l'ouverture hydraulique de la faille est un paramètre important qui avait été déterminé à partir de tests hydrauliques antérieurs. Aussi bien la raideur normale de la fracture que la raideur de la matrice rocheuse (représentée par le module d'Young) affectent la pente générale de la courbe pression/déplacement. Cependant, la largeur de la boucle est principalement fonction du contraste de propriétés mécaniques entre la fracture et la matrice rocheuse. La forme de la boucle étant contrôlée par le contraste de raideur, il est possible d'estimer de façon univoque la raideur normale de la fracture et le module équivalent de la masse rocheuse environnante par analyse de la pente et de la largeur de la boucle. Cependant, une telle rétro-analyse requiert une modélisation précise de la totalité de la boucle en considérant à la fois l'augmentation et la chute de pression dans une situation idéale d'écoulement radial symétrique. L'étude de sensibilité indique que si une ou plusieurs fractures de forte perméabilité intersectent la fracture pressurisée près du point d'injection, des fuites importantes dans ces discontinuités adjacentes peuvent induire des déviations significatives de la solution idéale et produire des erreurs importantes dans les valeurs de raideur rétro-analysées. En outre, du cisaillement le long des joints de stratification peut générer une ouverture additionnelle de la faille près de la zone d'injection, ce qui a un impact sur les propriétés hydromécaniques rétro-analysées de la faille pressurisée.

5.3. Décalage temporel et loi d'écoulement hydromécanique

Les mesures in situ montrent un décalage temporel entre la pression et le déplacement mécanique, avec le pic de déplacement se produisant légèrement après le pic de pression et créant la boucle pression/déplacement (Fig. 3b). La présente analyse numérique peut reproduire et expliquer le comportement boucle à la fois en HM1 et en HM2. Cependant, il y a un décalage temporel important entre le pulse de pression induit en HM1 et le pulse de

pression se propageant jusqu'en HM2 situé 1 m plus haut. Ce décalage dans les réponses en pression n'est pas bien restitué dans l'analyse actuelle, dans laquelle le décalage temporel simulé entre les réponses hydrauliques en HM1 et en HM2 est plus court que celui observé. Les résultats numériques ont été obtenus en utilisant la loi cubique modifiée (Witherspoon et al. 1980; Rutqvist et Stephansson 2003) comme équation de couplage pour l'écoulement. Dans cette loi de comportement, la seule propriété hydraulique de la fracture contrôlant l'écoulement est l'ouverture hydraulique, laquelle semble insuffisante pour entièrement décrire l'écoulement dans une fracture (Zimmerman et al. 1990a). Une loi d'écoulement plus complexe incluant une équation de diffusion qui considère explicitement l'ouverture hydraulique, la perméabilité et l'emménagement de la fracture pourrait mieux décrire la propagation du champ de pression et ainsi expliquer les décalages entre les pics de pression en HM1 et en HM2, ainsi que la réponse mécanique résultante (Claesson et al. 1995).

5.4. Hétérogénéité des propriétés hydromécaniques des fractures

L'étude actuelle démontre que les propriétés de la fracture, telles que l'ouverture hydraulique et la raideur normale, peuvent varier d'un facteur 2 à 3 le long d'un même plan. Cette différence pourrait être expliquée par la complexité de la géométrie interne de l'espace des vides et de la distribution de la quantité et de la taille des aires de contact à l'intérieur du plan de fracture. Une telle variabilité des propriétés hydromécaniques, avec une distribution des pressions et de la raideur normale implicitement liées à la géométrie de l'espace des vides et des aires de contact, a déjà été observée sur des fractures seules à l'échelle du laboratoire (Henry et Sibaï 1997; Sibaï et al. 1997). Par exemple, Hopkins et al. (1990) montrent que la raideur normale peut varier de plusieurs ordres de grandeur avec le pourcentage des aires de contact à l'intérieur de la fracture. A grande échelle, des mesures d'ouverture de failles ont montré qu'un rejet cisailant initial peut induire une variabilité spatiale de l'ouverture, distribuée préférentiellement le long de chenaux (Hakami 1995; Rutqvist et Stephansson 2003). Les failles devraient donc être mieux représentées avec une largeur variable des vides et des aires de contact variables tenant compte de la variabilité des ouvertures hydrauliques et des raideurs normales (Myer 1991, 2000; Pyrak-Nolte et Morris 2000). De plus, cette géométrie pourrait permettre de considérer les effets de chenalisation à l'intérieur de la fracture. La chenalisation peut induire un effet "d'insuffisance de l'augmentation de pression" (Zimmerman et al. 1990b) qui peut induire des déplacements variables le long d'un plan de fracture, comme ceux observés en HM1 et HM2. Ainsi, des essais hydrauliques comme des tests d'interférences entre puits devraient être réalisés en différents points afin de caractériser l'hétérogénéité des propriétés hydrauliques et mécaniques. Un point de mesure ne peut pas être suffisant pour évaluer une valeur représentative sur tout le plan de fracture.

5.5. Contribution de l'analyse hydromécanique pour l'estimation précise de l'ouverture hydraulique de la fracture

L'ouverture hydraulique de la faille pressurisée, antérieurement déterminée à partir de divers essais hydrauliques et vérifiée par la présente modélisation numérique des données hydromécaniques in situ, a été comparée avec les valeurs d'ouverture hydraulique déterminées en utilisant les techniques analytiques conventionnelles (Cooper et al. 1967; Wang et al. 1977; Bredehoeft et Papadopoulos 1980; Barker et Black 1983; Black 1985; Barker 1988). En utilisant ces méthodes, la perméabilité de la fracture est déterminée par calage de la phase de chute de pression sur des courbes types sans considération des processus couplés

hydromécaniques. L'ouverture hydraulique de la fracture est ensuite déduite de la perméabilité en utilisant la loi cubique (Witherspoon et al. 1980). Dans ce cas, les méthodes conventionnelles (ex. solutions analytiques en écoulement radial de Wang et al. (1977), et Bredehoeft et Papadopoulos (1980)) surestiment la perméabilité d'un facteur 8 à 10. Afin d'éviter de telles erreurs d'interprétation, les solutions analytiques devraient être adaptées afin d'inclure l'analyse de la phase d'augmentation de pression du pulse. De plus, l'analyse des mesures de pression/déplacement dans ce processus d'évaluation peut être utilisée pour contraindre la détermination de l'emménagement de la fracture. Dans une telle configuration, une gamme raisonnable de propriétés hydrauliques intrinsèques de la fracture testée pourrait être obtenue. Les mesures simultanées hautes fréquences des variations de pression de fluide et de déplacement mécanique sont très utiles dans le suivi complet des réactions hydromécaniques transitoires que peut subir la fracture durant un test d'injection pulse, et peuvent fournir une amélioration substantielle de l'estimation de l'ouverture hydraulique de la fracture. Les courbes complètes de pression/temps et déplacement/temps, incluant les phases d'augmentation et de chute de pression, sont nécessaires pour une analyse précise de ce type de pulse test.

5.6. Comportement mécanique de la masse rocheuse environnante sur la fracture pressurisée

La boucle pression/déplacement normal montre clairement deux types d'informations distinctes sur la zone fracturée testée. La modélisation indique que l'analyse hydromécanique de la phase d'augmentation de pression du pulse peut fournir une estimation précise des propriétés hydromécaniques de la fracture à condition que le module d'Young de la matrice rocheuse soit connu, ce qui peut être déterminé à partir d'essais en laboratoire. De plus, les simulations indiquent que la phase de chute de pression du pulse est affectée par les propriétés hydrauliques et mécaniques de la masse rocheuse fracturée environnante. La comparaison entre le modèle de référence avec toutes les fractures et les autres géométries de modèles (Cas I, II, III), dans lesquels le nombre de discontinuités environnant la faille pressurisée F12 a été réduit, montre que l'ouverture, la fermeture et le cisaillement se produisant à l'intérieur de ces discontinuités, peuvent avoir un impact significatif sur la réponse hydromécanique de la discontinuité testée. Cela signifie que la phase de chute de pression du pulse pourrait être utilisée pour estimer des propriétés mécaniques équivalentes de la masse rocheuse environnant la discontinuité testée. Ces propriétés équivalentes incluent les effets composites de la géométrie du réseau de fractures et de la matrice rocheuse.

6. Conclusion

Les mesures simultanées de pression de fluide et de déplacement mécanique montrent des réponses hydromécaniques in situ variables et interdépendantes au sein d'un massif rocheux fracturé hétérogène. Elles indiquent que le couplage hydromécanique est contrôlé par un comportement hydraulique de double perméabilité de fractures associé à un comportement mécanique de double rigidité de fractures, et, qu'il prédomine dans les fractures de plus grande perméabilité qui contrôlent la déformation mécanique des zones peu perméables environnantes.

A l'échelle de la fracture unique, une injection de type pulse test couplée à des mesures hautes fréquences de pression et de déplacement mécanique apparaît comme une nouvelle méthode

utile pour la caractérisation in situ des massifs rocheux fracturés. Cette méthodologie peut être utilisée pour déterminer la raideur normale et l'ouverture hydraulique des fractures, ainsi que la raideur équivalente de la masse rocheuse environnant la fracture pressurisée. Néanmoins, l'évaluation d'une injection pulse par modélisation hydromécanique couplée doit être effectuée avec précaution car la réponse du réseau de fractures est très complexe. Les tests peuvent être évalués par des modèles considérant soit un milieu à fractures discrètes ou un milieu idéalisé composé de la fracture pressurisée emballée au sein d'un milieu continu équivalent reproduisant le comportement de la roche fracturée environnante. Les erreurs d'interprétations potentielles de l'ouverture hydraulique par calage analytique de données de chute de pression sur les courbes types conventionnelles peuvent être évitées avec une analyse hydromécanique appropriée des courbes complètes de pression en fonction du temps et déplacement normal en fonction du temps en considérant aussi bien les phases d'augmentation et de chute de pression du pulse.

Remerciements

L'auteur remercie ses collaborateurs, Yves Guglielmi et Stéphane Gaffet (Géosciences Azur), Jonny Rutqvist et Chin-Fu Tsang (Lawrence Berkeley National Laboratory), Alain Thoraval et Medhi Ghoreychi (Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels) pour leurs commentaires et le travail réalisé ensemble. Ce travail a été financé par l'INERIS dans le cadre du programme de recherche BCRD-DR02. Cette publication a reçu le prix Jean Goguel 2005, décerné par le Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement.

Références

- Barker JA (1988) A generalized radial flow model for hydraulic testing in fractured rock. *Water Resour Res* 24(10):1796–1804
- Barker JA, Black JH (1983) Slug tests in fissured aquifers. *Water Resour Res* 19:1558–1564
- Black JH (1985) The interpretation of slug tests in fissured rocks. *Q J Eng Geol* 18:161–171
- Bredehoeft JD, Papadopoulos S (1980) A method to determine the hydraulic properties of tight formations. *Water Resour Res* 16:233–238
- Cappa F, Guglielmi Y, Fénart P, Merrien-Soukatchoff V, Thoraval A (2005a) Hydromechanical interactions in a fractured carbonate reservoir inferred from hydraulic and mechanical measurements. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 42:287–306
- Cappa F, Guglielmi Y, Gaffet S, Lançon H, Lamarque I (2005b) Use of in situ fiber optic sensors to characterize highly heterogeneous elastic displacement fields in fractured rocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* (sous presse)
- Cappa F, Guglielmi Y, Rutqvist J, Tsang C-F, Thoraval (2005c) A in situ coupled hydromechanical behaviour of a deformable rock fracture in an high-permeability fracture network: field measurements and numerical modelling. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* (soumis pour publication en Août)

Claesson J, Follin S, Hellström G, Wallin NO (1995) On the use of the diffusion equation in test case 6 of DECOVALEX. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 32:525–528

Cook NGW (1992) Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress. In: Jaeger Memorial Didaction Lecture, *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 29:198–223

Cooper HH, Bredehoeft JD, Papadopoulos IS (1967) Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resour Res* 3:263–269

Cornet FH, Morin RH (1997) Evaluation of hydromechanical coupling in a granite rock mass from a high-volume high-pressure injection experiment: Le Mayet de Montagne, France. *Int J Rock Min Sci Geomech Abstr* 34:207

Cornet FH, Li L, Hulin JP, Ippolito I, Kurowski P (2003) The hydromechanical behaviour of a fracture: an in situ experimental case study. *Int J Rock Min Sci Geomech Abstr* 40:1257–1270

Cundall PA (1988) Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 25:107–116

Gentier S, Hopkins D, Riss J (2000) Role of fracture geometry in the evolution of flow paths under stress. In: *Dynamic of fluids in fractured rock*, Geophysical Monograph 122:169–183

Guglielmi Y (1998) Hydromechanics of fractured rock masses: results from an experimental site in limestone. In: Rossmann H-P (ed) *Mechanics of jointed and faulted rock*. Balkema, Rotterdam, pp 621–624

Guglielmi Y, Mudry J (2001) Quantitative measurements of channel-block hydraulic interactions by experimental saturation of a large, natural, fissured rock mass. *Ground Water* 39:696–701

Hakami E (1995) Aperture distribution of rock fractures. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden

Henry JP, Sibai M (1997) Couplage hydromécanique dans les joints rocheux sous sollicitations normales: proposition de modélisation et comparaison avec l'expérience. *Expérimentation et Calcul en Génie Civil* 47(54):47–54

Hopkins DL (2000) The implications of joint deformation in analyzing the properties and behaviour of fractured rock masses, underground excavations and faults. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 37:175–202

Hopkins DL, Cook NGW, Myer LR (1990) Normal joint stiffness as a function of spatial geometry and surface roughness. In: *Rock Joints*, Barton, Stephansson (eds) Balkema, Rotterdam, pp 203–210

Jackson LB (1995) *Digital filters and signal processing*. 3rd ed, Kluwer, Dordrecht

Jung R (1989) Hydraulic in situ investigation of an artificial fracture in the Falkenberg granite. *Int J Rock Min Sci Geomech Abstr* 26:301–308

Makurat A, Barton N, Rad NS (1990) Joint conductivity variation due to normal and shear deformation. In: Barton N, Stephansson O (eds) *Rock Joints*. Balkema, Rotterdam, pp 535–540

McElwee CD (2002) Improving the analysis of slug tests. *J Hydrol* 269:122–133

Myer LR (1991) Hydromechanical and seismic properties of fractures. In: Wittke W (ed) *Proceedings of the 7th International Congress Rock Mechanics Aachen, Germany*. Balkema, Rotterdam, pp 397–404

Myer LR (2000) Fractures as collections cracks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 37:231–243

Pyrak-Nolte LJ, Morris JP (2000) Single fractures under normal stress: the relation between fracture specific stiffness and fluid flow. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 37:245–262

Raven KG, Gale JE (1985) Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 22:251–261

Rutqvist J (1995) Determination of hydraulic normal stiffness of fractures in hard rock from well testing. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 32:513–523

Rutqvist J, Stephansson O (1996) A cyclic hydraulic jacking test to determine the in situ stress normal to a fracture. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 33:695–711

Rutqvist J, Stephansson O (2003) The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. *Hydrogeology J* 11:7–40

Rutqvist J, Tsang CF (2002) A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂-injection into brine formation. *Environ Geol* 42(2–3):296–305

Rutqvist J, Noorishad J, Tsang C-F, Stephansson O (1998) Determination of fracture storativity in hard rocks using high-pressure injection testing. *Water Resour Res* 34:2551–2560

Sibai M, Haji Sotoudeh M, Henry JP (1997) Etude expérimentale du couplage hydromécanique de joints rocheux. *Revue Française de Géotechnique* 81:33–39

Tsang CF (1999) Linking thermal, hydrological, and mechanical processes fractured rocks. *Annu Rev Earth Planet Sci* 27:359–384

Tsang YW, Witherspoon PA (1981) Hydromechanical behaviour of a deformable rock fracture subject to normal stress. *J Geophys Res* 86:9287–9298

Tsang YW, Witherspoon PA (1983) The dependence of fracture mechanical and fluid flow properties of fracture roughness and sample size. *J Geophys Res* 88:2359–2366

Wang JSY, Narasimhan TN, Tsang CF, Witherspoon PA (1977) Transient flow in tight fractures. *Well Testing Symposium*, Berkeley, pp 103–116

Witherspoon PA, Wang JSY, Iwai K, Gale JE (1980) Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resour Res* 16:1016–1024

Zangerl C, Eberhardt E, Loew S (2003) Ground settlements above tunnels in fractured crystalline rock: numerical analysis of coupled hydromechanical mechanisms. *Hydrogeol J* 11:162–173

Zimmerman RW, Chen DW, Cook NGW (1990a) The effect of contact area on the permeability of fractures. *J Hydrol*, 139:79–96

Zimmerman RW, Chen DW, Long JCS, Cook NGW (1990b) Hydromechanical coupling between stress, stiffness and hydraulic conductivity of rock joints and fractures. In: Barton N, Stephansson O (eds) *Rock joints proceedings of the International Symposium*, Balkema, Leon